

テニス・ストローク動作のシミュレーションシステム

Simulation System for Improving Tennis Stroke Motion

岡村 麻人 石井 壮郎 窪田 辰政
OKAMURA Asato, ISHII Takeo, KUBOTA Tatsumasa
林 恵嗣 三橋 大輔
HAYASHI Keiji, MITSUHASHI Daisuke

【要旨】

スポーツ現場において多くの選手が「上手になりたい」というニーズを持っている。そこで筆者らは「競技成績を高める動作」をコンピュータ上で計算し、その動作を提案するシステムを構築した。大学体育会女子テニス部員10名を対象にし、光学式三次元動作解析装置を用いてフォアハンドストロークの計測を行った。その際、各被験者のヘッドスピードと競技成績を調査し、これらのデータをデータベース化した。このデータベースに対して主成分分析を行い、抽出した主成分と競技成績やヘッドスピードとの相関関係を調査した。ここに最適化手法を組み合わせることで、「競技成績を高める動作」とそのときのヘッドスピードを短時間かつオーダメイドにコンピュータ上で探索できるようにした。作成された動画は3Dアニメーションとして表示され、あらゆる視点から観察できる。本システムを用いることで、選手はオリジナルの動作とコンピュータが作成する手本動作とを比較し、イメージトレーニングを行いながら、練習を行うことができる。

キーワード：テニス、ストローク動作、シミュレーション、主成分分析、最適化計算

I. 諸言

1. 背景

スポーツ現場において多くの選手が「上手になりたい」というニーズを持っている。こうしたニーズに応えるため、指導者は選手に動作指導を行うが、その際に「言葉かけ」を行うことが多い。例えば、テニスの現場では「ティクバックをもっとはやすく引こう。」「身体の軸をブラさないように注意しよう。」などの「言葉かけ」が頻繁に聞かれる。

しかし、指導者の「言葉かけ」が必ずしも意図したとおりに選手に理解されるとは限らない¹⁾。例えば、テニスのストローク動作において、指導者は「タイミングが早いこと」を想定して「ティクバックをもっとはやすく引こう。」と選手に伝えて、選手は「動作のスピードが速いこと」をイメージしてしまうかもしれない。

そこで、スポーツ現場では「言葉かけ」を補助する目的で、「視覚的フィードバック」による動作学習が古くから行われるようになった。最も単純な「視覚的フィードバック」の方法としては、鏡の利用が挙げられる。鏡の前での動作の反復練習は古くから行われてきたが、鏡を用いた「視覚フィードバック」には2つの問題点があった²⁾。一つは視点が限られることであり、もう一つは選手が動作中に自身の動作の確認を行わなければならないため、動作そのものに影響がであることである。

このような問題を解決するため、近年では鏡に代わってビデオがさまざまなスポーツで活用されるようになった^{3)~11)}。また、「視覚的フィードバック」を有効に行うシステムも数多く提案されてきた^{2)、12)~15)}。例えば、三上ら(2013)²⁾は、さまざまなスポーツ動作を対象にし、実際に行つた動作を短時間の遅延を加えて再生し画面に表示させるシステムを提案している。

このようなシステムでは、動作後すぐに自身の動作を把握できる点で優れていた。

- しかしながら、このシステムで表される映像は、以下の点で大きな問題が残っていた。
- ① 一方方向のみからの映像であるため、他の方向からの身体動作の観察が不可能であること
 - ② 平面的で立体感に欠けるため、回転やひねりなどの動作の見極めが困難であること
 - ③ 動作そのものの観察を妨げる付加的な情報（表情、衣服、周辺環境など）が多いこと

このような問題点は、学習者本人へのスポーツ動作（視覚情報）の正確なイメージをつける上で、障害となる要因である。つまり、これらの問題によって、学習者に誤った動作イメージを与え、学習者の運動パフォーマンス（記録・成績）を低下させうる。

このような問題を解決するため、石井(2015)¹⁶⁾は、光学式三次元動作分析装置で収集した投球動作のデータベースから、障害を最小にしつつパフォーマンスを最大にする投球動作を導き出すシミュレーションを開発した。このシミュレーションは、選手の多種多様なニーズを複合的に満たす動作パターンを、3Dアニメーションであらゆる視点から閲覧できる点が優れていた。また、精巧な骨格モデルで動作が表現されており、動作そのものの観察が可能であった。

そこで、本研究ではテニスのストローク動作を対象とし、石井が提案した手法¹⁶⁾を用いて、「競技成績を高める動作」を各選手に対してオーダーメイドに提案するシステムを構築することを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は、大学体育会硬式庭球部に所属する女子テニス選手10名とした。被験者は右打ちかつ片手打ちの選手を対象とし、左打ちの選手および両手打ちの選手は除外した。本研究では、筑波大学人間系研究倫理委員会の承認を得ることに加え、予め各被験者に対して本研究の趣旨を十分に説明し、文書にて参加の同意を得た。表1に被験者の特性を示した。なお、本研究では過去1年間の大学での最高競技成績を「競技成績」とした。また、ユニバーシアードとは世界大学選手権大会のことである。順序尺度については、次節で詳細に記述する。

テニス・ストローク動作のシミュレーションシステム

表1 被験者の特性

被験者	身長(m)	体重(kg)	年齢(歳)	競技歴(年)	競技成績	順序尺度	ヘッドスピード (km/h)
IS	1.64	58	23	19	ユニバーシアード優勝	10	126.4
MK	1.67	59	19	15	全日本学生ベスト8	8	120.4
FS	1.59	56	21	15	全日本学生出場	7	128.7
NY	1.66	51	20	10	全日本学生出場	7	119.8
FN	1.59	49	21	11	関東学生 2次予選出場	5	102.8
MN	1.62	52	21	11	関東学生 2次予選出場	5	106.5
SK	1.64	55	20	13	関東学生 2次予選出場	5	110.3
SY	1.65	60	20	8	関東学生 2次予選出場	5	117.4
NH	1.56	53	20	10	関東学生 2次予選出場	5	108.4
HK	1.62	60	19	12	関東学生 1次予選出場	4	113.9
平均	1.62	55	20	12			115.5
標準偏差	0.03	4	1	3			8.1

2. データベースの構築

被験者全員に対し、ストローク動作の motion capture を行い、ストローク動作中の全身の関節角度データとインパクト時におけるラケットのヘッドスピードを算出した。また、各被験者の競技成績を競技レベルとして順序尺度でデータ化した。そして、ストローク動作中の全身の関節角度・インパクト時におけるラケットのヘッドスピード・競技レベルデータから構成されるデータベースを作成した。

1) ストローク動作データ

motion capture では、被験者の全身 40 点とラケット 4 点に赤外線反射マーカーを貼付し、Vicon MX (インターリハ社) を用いて、被験者の 3 次元位置座標データを収集した。サンプリングレートは 250Hz とした。

図1に示したように、被験者には、室内のフォースプレート 2 枚の上に片足ずつ載せた状態から、右斜め前方のトスマシーン (アシックス社) より出されるボールを、前方に設置したネット越し的目的 (高さ :50cm, 幅:100cm) に向かって、スクエアスタンスによる最大努力で打球してもらった。



ストローク試技数は 1 人あたり 10 試技であった。その中からそれぞれの被験者の内省が 5 段階中最大であった 1 試技を分析対象として選び、解析を行った。すなわち、解析試技数は合計 10 試技であった。

解析区間は、全試技インパクトを基準とし、インパクト前 0.8sec からインパクト後 0.3sec とした。この区間を 101 フレーム (0.1sec/フレーム) に分割した。

図1 motion capture の様子

岡村 麻人、石井 壮郎、窪田 辰政
林 恵嗣、三橋 大輔

解析区間中の全身の関節角度は、ソフトウェア SIMM (Nac 社) を用いてモデリングを行い算出した。図 2 に本研究で用いたモデルを示した。

また、算出した関節自由度（合計 35 自由度）を以下に示す。

右肩関節（3 自由度：内外転、水平内外転、内外旋）、右肘関節（2 自由度：屈伸、前腕回内外）、右手関節（2 自由度：掌背屈、橈尺屈）、左肩関節（3 自由度：内外転、水平内外転、内外旋）、左肘関節（2 自由度：屈伸、前腕回内外）、左手関節（2 自由度：掌背屈、橈尺屈）、体幹（3 自由度：前後屈、側屈、回旋）、骨盤（3 自由度：前後傾、左右傾、回旋）、軸脚（右脚）股関節（3 自由度：内外転、屈伸、内外旋）、軸脚（右脚）膝関節（1 自由度：屈伸）、軸脚（右脚）足関節（2 自由度：底背屈、内外返し）、踏込脚（左脚）股関節（3 自由度：内外転、屈伸、内外旋）、踏込脚（左脚）膝関節（1 自由度：屈伸）、踏込脚（左脚）足関節（2 自由度：底背屈、内外返し）、ラケット（3 自由度：掌背屈、橈尺屈、前腕回内外）

なお、ラケットは右手と一体であると仮定した。そのため、ラケットの 3 自由度はそれぞれ、右手関節の掌背屈と橈尺屈、および右肘関節の前腕回内外の軸と同一とした。

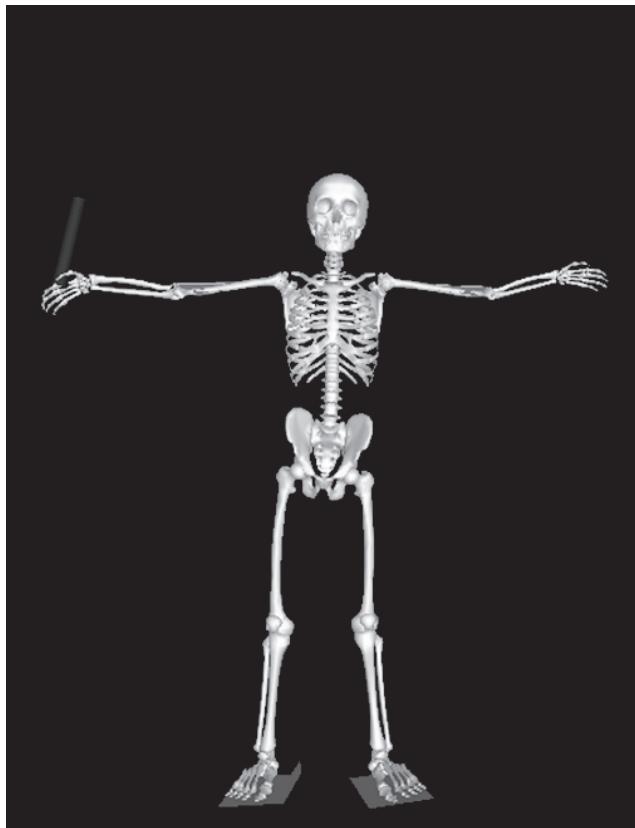


図 2 本研究で用いたモデル

本研究では、全身の骨格にラケットを追加したモデルを用いた。
ラケットは右手と一体であると仮定した。

2) 競技成績の順序尺度

表 1 に示した各被験者の過去一年間の大学での最高競技成績を、表 2 のように 7 段階の順序尺度でデータ化した。本研究では、順序尺度でデータ化された競技成績を競技レベルとした。なお、今回の被験者には競技レベル 6 および 9 にあたる選手は存在しなかった。

表 2 競技成績の順序尺度

競技成績	被験者	競技レベル
ユニバーシアード入賞以上	IS	10
ユニバーシアード出場以上		9
全日本学生大会入賞以上	MK	8
全日本学生大会出場以上	NY, FS	7
関東学生大会本戦出場以上		6
関東学生大会 2 次予選出場以上	FN, MN, SK, SY, NH	5
関東学生大会 1 次予選出場以上	HK	4

2. シミュレーションの構築

前節のデータベースと統計ソフトウェア (R ver.3.2.3)、表計算ソフトウェア (Excel 2013)、3D-viewer ソフトウェア (SIMM Viewer ver.6) を用いてシミュレーションの構築を行った。

1) 主成分分析

まず、データベース内の情報のパターンを客観的に分類するために、R を用いて相関行列主成分分析を行った。

ストローク動作データの 1 試技あたりの変数は、35 (関節自由度) × 101 (フレーム) の 3535 変数となった。その他にデータベース内には 1 試技あたりのヘッドスピードデータが 1 変数、競技レベルが 1 変数あり、ストローク動作データの変数と合わせて、計 3537 個の変数が存在した。今回解析した総試技数は 10 試技だったため、データベース内には 3 万 3537 個の情報があり、この情報全てを用いて主成分分析を行った。

主成分分析により、本データベースの主成分負荷量行列を求め、個々の選手のデータを主成分得点で表した。主成分の個数は固有値 > 1 を満たす範囲とした。

これにより、データベース内の任意の試技データ [動作、ヘッドスピード、競技レベル] から固有値と主成分負荷量行列を介し、その試技の主成分得点を求めるようになる。また逆に、主成分得点から固有値と主成分負荷量行列を介し、ある試技データ [動作、ヘッドスピード、競技レベル] を求めることも可能になる。本研究では、この双方向性の計算を Excel にて行える計算シートを作成した。

この計算シートを活用し、各主成分得点を変化させることで、新しいデータ [動作、ヘッドスピード、競技レベル] を容易に作り出すことができる。つまり、計算シート上で各主成分得点を変更することで、新しいストローク動作を簡便に作成でき、その動作の競技レベルとその動作時に生じ得るヘッドスピードを予測することができる。本研究では、こうした主成分分析の特徴を利用した手法 16) を用いて、シミュレーションシステムの根幹部を構築した。計算式の概要を以下に記載する。

[(関節角度+ヘッドスピード+競技レベル) データ]

= [主成分負荷量行列] [主成分得点]

2) 最適化計算

次に、競技成績を向上させるストローク動作パターンを求めるため、最適化計算を行った。最適化計算は、Excel にプログラムされているソルバー機能を使用した。図 3 に Excel のソルバーウィンドウの表示画面を示した。この最適化計算を行うために変化させる変数は主成分得点とした。また、今回の最適化計算を行う上での制約条件は、「各主成分得点の絶対値は 1 以下」と設定し、計算アルゴリズムは「非線形 GRG」を用いた。

最適化計算を行い、競技成績を向上させるのに必要な主成分得点の組み合わせを求めた。次に、上述 1) の計算シートを用い、その主成分得点から主成分負荷量行列を介して全身の関節角度を算出した。この全身の関節角度を 3D-viewer ソフトウェアに入力し、ストローク動作の 3D アニメーションをパソコン上で閲覧できるようにした。



図 3 Excel のソルバーウィンドウ

まず、目的セル（本研究では、戦績）を設定する。

次に、制約条件を設定する。

最後に、「解決」をクリックすると、戦績を向上させるのに必要な主成分得点の組み合わせが求まる。

III. 結果

1. ヘッドスピード

表 1 に各被験者のインパクト時におけるラケットのヘッドスピードを示した。インパクト時のヘッドスピードの平均は、 $115.5 \pm 8.1 \text{ km/h}$ であった。

2. 主成分分析の結果

データベース内の情報を主成分分析したところ、3537 変数は 10 変数に可逆圧縮され、その累積寄与率は 89.89% であった。これは、データベース内の情報の 89.89% は独立した 10 の主成分に集約されたことを意味する。この分析によって、10 試技それぞれの主成分得点が求められ、個々のデータを 10 個の数値でパラメータ化できた。

3. 各主成分と競技レベル・ヘッドスピードとの相関

各主成分と競技レベル・ヘッドスピードとの相関係数を図 4 に示した。

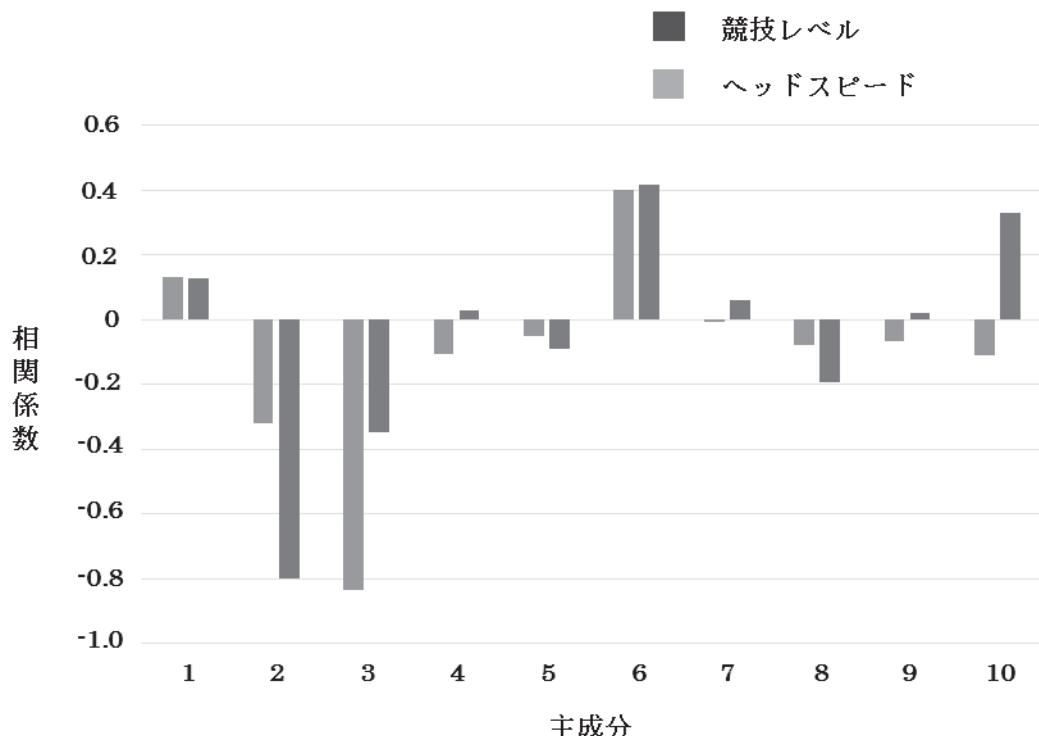


図 4 各主成分と競技レベル・ヘッドスピードとの相関

4. シミュレーション結果

前章の最適化計算を用いたシミュレーション結果について、典型例として MN のシミュレーション結果の一部を図 5 に示した。図 5 の左図はオリジナル動作、右図は最適化計算で競技レベルを最大値に設定して求めたシミュレーション結果である。本システムでは、この結果をパソコン上の

3D アニメーションであらゆる角度から閲覧できる。本稿では、インパクト 70 フレーム前をテイクバックと定義し、図 5 のようにその時の姿勢を静止画で図示した。制約条件の範囲での推定最大競技レベルは 8.1 (オリジナルは 5)、その動作で予測されるラケットヘッドスピードは 120.2km/h (オリジナルは 106.5 km/h) であった。また、図 4 に示した姿勢の相違点が競技レベルに密接に関連する。この選手の場合、①テイクバック時に体幹をより捻ること、②右腕の位置がより高くなるようにラケットを引くこと、③踏込脚 (左脚) を内側に入れ、体が開かないようにすることといった 3 点の動作改善を行うことで、競技レベルが向上することが推察された。

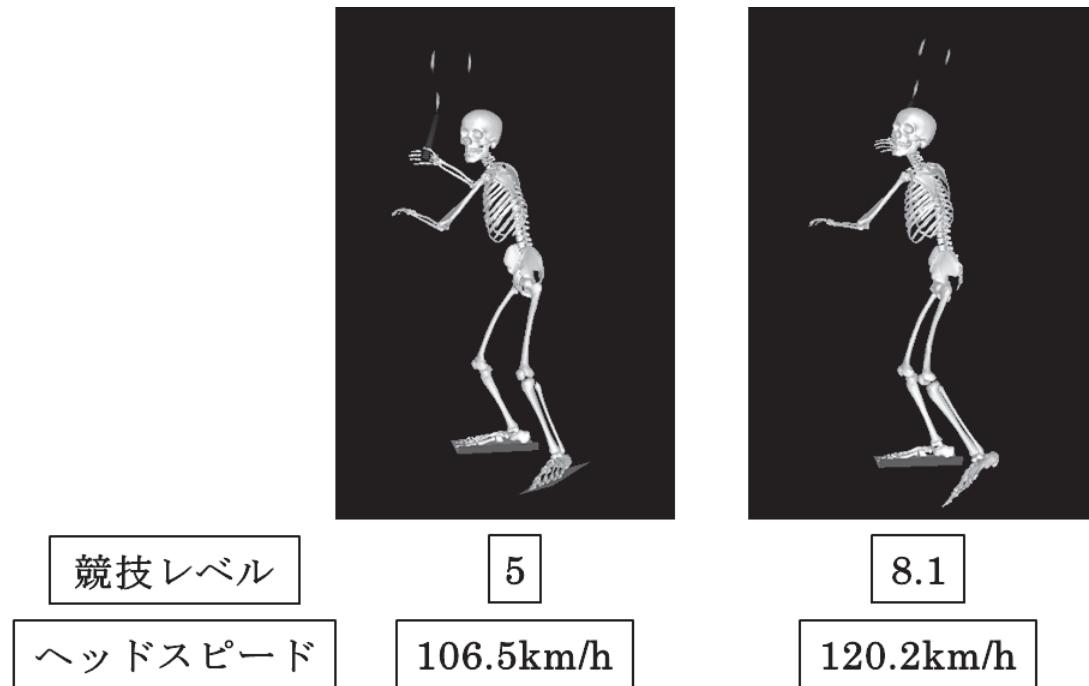


図 5 MN のシミュレーション結果 (テイクバック時の姿勢)

左図：オリジナル動作 (MN)

右図：シミュレーションされた動作

IV. 考察

1. 主成分分析を用いた理由

「体が開いている」「手打ちである」などは、現場でストローク動作を表現するときによく使われる用語である。しかし、こうした用語が動作を分類する上で客観性があるとは言い難い。

また、バイオメカニクス領域では「外転 30°」「外旋 50°」など、動作方向とその関節角度で姿勢や動作を表現することが多い。しかし、生体では「外転角度が変化すると外旋角度の可動域も変化する」というように、動作中の関節角度は互いに影響し合っている。よって、関節角度で動作を分類しようとなれば、いたるところで相互作用の影響をうけることになる。

動作パターンを分類する上で重要なことは、①分類において客観性を持ち、②それぞれの動作パターンが互いに影響を受けず、独立していることである。

主成分分析では、データがもつ分散の最も大きくなる軸を第 1 主成分と定義し、分散の大きい順に各主成分を求め、各主成分は互いに直行する。主成分分析を本研究に適用すれば、この分析はデータ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕の特徴が大きく表されているパターン(=主成分)を順々に求めていく。求められたパターンは互いに影響を及ぼさず独立していることを意味する。したがって、主成分分析は動作のパターン分類において重要と考えられる点を網羅している。

また、主成分分析では主成分負荷量行列が求まり、この行列を用いることにより、それぞれの試技データ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕を主成分得点で表すことができる。すなわち、非常に変数の多い複雑な現象を、少ない数値で簡単にパラメータ化できる。本研究のデータベースには、当初 3 万 5370 個の変数が存在したが、主成分分析を行うことにより、わずか 10 変数(主成分)に集約することができた。各試技のデータ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕と主成分得点は、主成分負荷量と固有値を介して双方向性に計算できるため、データ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕から主成分得点を求めることが可能である。さらに、主成分得点を操作することにより、新しいデータ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕を容易に作り出すこともできる。

本研究は、こうした手法¹⁶⁾をストローク動作に適用したものである。この手法により、大量のデータからそのパターンを客観的に分類でき、データを数値でパラメータ化することで容易に新しいデータを作成できるようになった。

2. シミュレーションの実際

本研究結果を主成分分析の原理から解釈すれば、第 1 主成分とはデータベース内のデータ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕の特徴が最も大きく表れているパターンである。第 2 主成分とは、データ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕の特徴が 2 番目に大きく表れているパターンである。第 3 主成分以降も同様である。このとき各主成分は独立しており、それぞれのパターンは互いに全く影響をうけない。

各主成分得点がすべて 0 ということは、そのデータ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕が平均であることを意味する。つまり、全ての主成分得点を 0 に設定すると、競技レベルが平均のストローク動作が生成され、その動作においては、平均のヘッドスピードが生じると予測される。

ある主成分得点を変化させると、データ〔動作、競技レベル、ヘッドスピード〕はその主成分のパターン上で変化する。主成分得点の 1 点は、1 標準偏差を意味する。したがって、主成分得点を変更する範囲が 3 点を超えると、統計学的にはほぼあり得ないデータ〔動作、競技レベル、ラケッ

トヘッドスピード]が生成されてしまう。妥当性のあるシミュレーションを行うためには、主成分得点を変更する範囲に注意が必要である。こうした理由から、本研究の最適化計算を行う際の制約条件は、「各主成分得点の絶対値は1以下」とした。

図4より、競技レベルと比較的高い相関関係にある主成分は、第2・第3・第6・10主成分であった。したがって、競技レベルと関連性のあるストローク動作をシミュレーションで作成したい場合は、この3つの主成分得点を主体に数値を変更すればよいことになる。それらの主成分得点を増加させれば、競技レベルが高まるストローク動作が作成され、その主成分得点を減少させれば、競技レベルが減少するストローク動作が作成される。そして、その時のヘッドスピードを予測することができる。

一方、ヘッドスピードと比較的高い相関関係にある主成分は、第2・第3・第6主成分であり、競技レベルと似た傾向を示していた。しかし、相関が最も大きい主成分は、競技レベルの場合は第2主成分、ヘッドスピードの場合は第3主成分であり、若干の違いが見られた。

本システムでは、各主成分を線形代数的に合成することができる。これにより、さまざまな主成分を合成した新しいストローク動作を作り出せ、その動作におけるヘッドスピードを予測することが可能である。

また、本システムでは3D-viewerを用いることで、シミュレーション結果のストローク動作を通常のパソコン上で3Dアニメーションとして閲覧できる。よって、選手にとってはストローク動作を視覚的に確認でき、イメージトレーニングのための理解しやすい教材になると考えられる。

3. 最適化シミュレーションの活用法

本研究では、最適化計算を行うことによって、競技レベルを高める動作パターンを素早くオーダーメイドに作成できる。また、本研究で設定した以外の目的関数を新しく設定することも可能である。

本研究では、競技レベルを最大にする動作パターンを各選手に対してオーダーメイドに求めた。求めた動作は、自身のオリジナル動作とを動画と静止画の両方で比較検討できる。このシミュレーションでは、オリジナル動作と競技レベルが最大となる動作の大きく異なるところが、その選手における競技レベルの向上と密接な関係を持っていることを意味する。そして、動作パターンの違いが、現場における個々への指導戦略に利用できると考えられる。

今後こうした最適化シミュレーションが真に役立つかどうかについては、前向きに検証していく必要がある。

V. 今後の課題

本研究でのデータベースの被験者は、大学女子テニス選手であった。本研究で用いた手法は、方法論としてはほぼ確立しており、解析の安定性がよいことから、今後さまざまな世代の被験者を増やすことで、普遍性や応用性がますます高まることが期待される。そのためには、今後さまざまな施設間で多種多様なデータを収集し、共通のデータベースを構築していくことが重要だと考えられる。

本システムは、motion captureシステムが存在することを前提としているが、現状では、motion captureシステムは高価でスポーツ現場に設置することは困難である。現場向きにこうしたシミュレーションシステムを普及させていくためには、簡便で安価な計測装置を用いたシミュレーションシステムが必要とされ、今後目指していく課題である。

VI. 結論

今回構築したシステムでは、競技レベルを向上させる動作を素早くオーダーメイドに提案できる。本システムでは、結果を3Dアニメーションを用いて表示するため、現場でのイメージトレーニングに役立つと考えられる。

VII. 引用文献

- (1) 松田岩男. 運動技能の指導と言語教示や示範. 体育の科学. 1979, vol.29, p.444-446
- (2) 三上弾, 松本鮎美, 門田浩二, 川村晴美, 小島明. 動作学習のための遅延同期ビデオフィードバックシステム. 研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL). 2013, vol.2, p.1-8
- (3) Van Wieringen P.C., Emmen H.H., Bootsma R.J., Hoogesteger M., Whiting H.T. The effect of video feedback on the learning of the tennis service by intermediate players. Journal of Sports Science. 1989, vol.7, no.2, p.156-162
- (4) Gadagnoli M., Holcomb W., and Davis M. The efficacy of video feedback for learning the golf swing. Journal of Sports Science. 2002, vol.20, no.8, p.615-622
- (5) 小澤治夫, 石田譲, 岡崎勝弘, 西島尚彦. 鉄棒単元におけるスポーツミラーによる運動画像の即時フィードバックの効果. 北海道教育大学釧路校研究紀要. 2003, vol.35, p.1-6
- (6) 磯繁雄, 田内健二, 土江寛裕. 陸上競技における技術トレーニングに対する即時フィードバックシステムの有用性. 財団法人ミズノスポーツ振興会助成金研究報告書. 2006, p.1-5
- (7) 村山光義, 村松憲, 佐々木玲子, 清水靜代, 野口和行. 動作映像の即時フィードバックを用いた技術指導の効果: フライングディスク・サイドアームスロー導入時の事例. 慶應義塾大学体育研究所紀要. 2007, vol.46, no.1, p.1-15
- (8) Boyer E., Miltenberger R., Batsche C., and Fogel V. Video modeling by experts with video feedback to enhance gymnastics skills. Journal of Applied Behavior Analysis. 2009, vol.42, no.4, p.855-860
- (9) 佐々木直基. 視覚的フィードバックが運動スキル獲得に与える影響. びわこ成蹊スポーツ大学研究紀要. 2011, vol.8, p.121-127
- (10) 寺井宏文, 立正伸. 映像フィードバックを用いた練習がバッティング技術に与える影響. スポーツパフォーマンス研究. 2011, vol.3 p.138-152
- (11) 竹内洋輔, 野口和行, 中村正雄. 映像による即時フィードバックを利用した技術指導の方法に関する検討—大学体育スケート実習スケート初心者に対する片足滑走を事例として—. 法政大学スポーツ健康学研究. 2014, vol.5, p.65-75
- (12) 篠俊一郎, 斎藤隆文, 田中秀幸. スポーツ指導のためのビデオ映像処理. 情報処理学会研究報告, グラフィクスとCAD (CG) . 2003, vol.15, p.37-42
- (13) 玉木徹, 牛山幸彦, 八坂剛史. スポーツ選手の技能向上のための動画像処理とその実用化. 電子情報通信学会技術報告, パターン認識・メディア理解研究会. 2005, no.116, p.13-18
- (14) 河瀬裕美, 松塙茜, 音と画像処理を用いたリアルタイムスポーツ学習支援システム. 情報処理学会シンポジウム論文集. 2011, vol.3, p.465-468
- (15) 木下徹, 加藤伸子. 聴覚障害者のためのビジュアルフィードバックを用いた学習システムの検討. 筑波技術大学テクノレポート. 2012, vol.19, no.2
- (16) 石井壮郎. 投球動作のモーション・シンセサイザ～障害予防をめざした統計モデルの活用～. バイオメカニズム学会誌. 2015, vol.39, no.1, p.1-6